Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 409-422

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۴۲۲-۴۰۹

مقاله علمی-پژوهشی

تاثیر متغیرهای خشک کردن جت برخوردی بر سینتیک خشک شدن و برخی مشخصه‌های کیفی برگه‌های توت‌فرنگی

مهرزاد راد[۱]، هادی گلی[۲*]، فردین میراحمدی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹

چکیده

توت‌فرنگی به‌دلیل داشتن آنتی‌اکسیدان‌های طبیعی و ریز مغذی‌ها نقش مهمی را در سلامت انسان ایفا می‌کند. تقاضا برای افزایش زمان نگهداری، کاهش سرعت فرآیندهای میکروبی، کاهش وزن و حجم محصولات و در نهایت صادرات، خشک کردن این محصول ارزشمند را حائز اهمیت می‌نماید. یکی از روش‌های جدید خشک کردن استفاده از هوای جت برخوردی است که با کاهش زمان خشک شدن باعث افزایش کیفیت محصول نهایی از جمله تغییر رنگ پایین و ظرفیت آبگیری بالا می‌گردد. در این تحقیق از خشک‌کن جت برخوردی با قابلیت تنظیم دما و سرعت هوا و نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل استفاده گردید. آزمایش‌های خشک کردن برگه‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو متغیر شامل دمای هوا در سه سطح ۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس و سرعت هوای خروجی از نازل‌ها در سه سطح ۶، ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه و طرح یک متغیره برای بررسی تاثیر نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل در سطوح ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ انجام شد. نتایج نشان داد که متغیرهای دما و سرعت هوا بیشترین تاثیر و نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل کمترین تاثیر را بر مدت زمان خشک شدن داشتند. همچنین تاثیر دمای هوا بر نرخ خشک شدن بیشتر از سرعت هوا بود و با افزایش نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل، سرعت خشک شدن برگه‌ها کمتر شد. از دیگر نتایج تحقیق افزایش ضریب انتشار موثر همراه با افزایش دما و سرعت هوا است. مقدار ضریب نفوذ موثر از $۱/۶۲\times۱۰^{-۱۰}$ تا $۳/۲۴\times۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانیه تغییر کرد و انرژی فعال‌سازی ۱۲/۸ تا ۱۶/۷ کیلوژول بر مول تعیین شد. نتایج مدل‌سازی ریاضی نشان داد که مدل وانگ و سینگ به دلیل داشتن کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE=0.02) و بیشترین ضریب تبیین (R^2 =0.996) مدل مناسبی برای پیش‌بینی رطوبت خشک کردن می‌باشد. همچنین مشاهده شد که افزایش دما و سرعت هوای خروجی باعث کاهش نسبت آبگیری مجدد نمونه‌های خشک شده توت‌فرنگی شده و افزایش H/D افزایش آن را به دنبال داشته است. تحلیل آزمایش‌های تغییر رنگ نمونه‌ها نیز نشان داد که افزایش دما و سرعت هوا میزان تغییر رنگ را کاهش و بالا رفتن نسبت H/D مقدار آن را افزایش داده است.

واژه‌های کلیدی: انرژی فعال‌سازی، برگه توت‌فرنگی، تغییر رنگ، خشک‌کن جت برخوردی، نسبت آبگیری مجدد، نفوذ موثر رطوبت

مقدمه

توت‌فرنگی با نام علمی *Ananassa Fragaria* و متعلق به تیره گل سرخ می‌باشد که به دلیل بالا بودن ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و وجود مواد مغذی فراوان از جمله اسید آسکوربیک و پتاسیم نقش مهمی در سلامت انسان دارد. همچنین خطر ابتلا به بیماری‌های قلبی- عروقی، انواع سرطان، فشارخون، بیماری‌های التهابی و دیابت نوع دو را کاهش می‌دهد. توت‌فرنگی از نظر اقتصادی نیز اهمیت دارد چرا که میوه تازه و انواع فرآوری شده آن مثل آب‌میوه، مربا و ژله استفاده گسترده‌ای دارند و به همین دلیل است که بیشترین سهم تحقیق در خانواده توت‌ها را به خود اختصاص داده است (Giampieri *et al.*, 2015).

از محدودیت‌های مهم در تولید توت‌فرنگی پایین بودن عمر انبارمانی، فسادپذیری و ایجاد ضایعات قابل توجه پس از برداشت این محصول می‌باشد که به‌وسیله خشک کردن می‌توان تا حدود زیادی از آن‌ها جلوگیری کرد. از طرف دیگر به دلیل عدم امکان دسترسی به میوه‌های تازه به‌طور همیشگی و کم طرفدار بودن میوه‌های گلخانه‌ای، خشک کردن یکی از راه‌حل‌های مناسب برای بهره‌مندی همیشگی از خواص آن‌هاست. علاوه براین میوه‌های خشک‌شده حجم و وزن کمتر، ماندگاری بالا و رشد میکروبی پایینی داشته که این عوامل شرایط صادرات را نیز فراهم می‌کند (Alonzo-Macías *et al.*, 2013; Orsat *et al.*, 2006). از دیگر مزایای خشک کردن نسبت به سایر روش‌های فرآوری محصولات غذایی، می‌توان به

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران
۳- استادیار گروه مهندسی علوم و صنایع غذایی، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hgoli58@gmail.com)
DOI: 10.22067/jam.v11i2.83943

قابلیت نگهداری محصول در شرایط طبیعی محیط، کاهش هزینه‌های بسته‌بندی، انبارداری و توزیع محصول و همچنین ایجاد تنوع در محصول تولیدی اشاره کرد (Doymaz, 2004). لازم به ذکر است در این فرآیند باید به گونه‌ای عمل گردد که در کنار حفظ ماده غذایی در مقابل فساد، به شاخص‌های کیفی فرآورده از جمله ارزش غذایی، طعم، عطر، رنگ و بافت کمترین صدمه ممکن وارد گردد (Mwithiga and Olwal, 2005). روش‌های خشک کردن قدیمی به‌وسیله خورشید به دلیل پایین بودن کیفیت و عدم رعایت شرایط استریل، امروزه دیگر کاربرد ندارند و روش‌های صنعتی جایگزین آن‌ها شده است. ازجمله مواردی که در انتخاب روش خشک‌کردن حائز اهمیت است می‌توان به کیفیت محصول نهایی، میزان انرژی مصرفی، سرعت و هزینه خشک کردن اشاره کرد (Hafezi *et al.*, 2016; Sagar and Kumar, 2010).

جت برخوردی از جمله روش‌های پرکاربرد جهت سرد و گرم کردن سطوح می‌باشد که به‌دلیل انتقال حرارت بالا کاربردهای فراوانی در صنایع مختلف دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به صنایع غذایی، ساخت منسوجات و کاغذ اشاره کرد (Alnak and Karabulut, 2018; Mujumdar, 2006). خشک‌کن جت برخوردی یکی از روش‌های موثر خشک کردن می‌باشد که با استفاده از سرعت هوای بالا باعث افزایش سرعت انتقال حرارت و در نتیجه کاهش زمان خشک شدن می‌گردد (Qiu *et al.*, 2018). تا به حال مطالعات رضایت‌بخش بسیاری با استفاده از این دستگاه جهت خشک کردن محصولات کشاورزی مانند برگه کیوی (Huang *et al.*, 2017)، برگه پیاز (Li *et al.*, 2015) ، برگه جنسینگ آمریکایی (Wang *et al.*, 2015)، برگه ملون (Zheng *et al.*, 2014)، انگور بی‌دانه و هویج (Xiao *et al.*, 2010a; Xiao *et al.*, 2010b) و برگه سیب‌زمینی (Caixeta *et al.*, 2002) صورت گرفته است.

این خشک‌کن علاوه بر افزایش ضریب انتقال حرارت و سرعت خشک شدن محصول، کیفیت محصول خشک شده را نسبت به خشک‌کن‌های متداول بهبود بخشیده است (Wae-hayee *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015). به‌عنوان مثال محصول خشک شده با این روش در مقایسه با روش خشک کردن انجمادی مدت زمان نگهداری بیشتر و میزان آلودگی میکروبی کمتری دارد. همچنین میزان ترکیبات فنولی محصول نهایی نیز بیشتر است. مجموع این عوامل باعث شده خشک‌کن جت برخوردی یک روش خشک کردن مقرون به صرفه از نظر اقتصادی به‌شمار آید (Jung *et al.*, 2015). از طرفی بازده انتقال حرارت پایین در خشک‌کن‌های متداول را می‌توان مهمترین علت اتلاف انرژی دانست. موریس (۱۹۹۴) در بررسی بازدهی خشک‌کن‌ها به این نتیجه رسید که بازده انرژی خشک‌کن هوای جت حدود ۶۵ درصد و در خشک‌کن‌های دیگر تنها ۳۵ درصد بود (Morris, 1994). همچنین لی و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که پتانسیل صرفه‌جویی در مصرف انرژی در صنایع پخت نان در فرانسه با استفاده از تکنولوژی هوای جت می‌تواند به بالاتر از ۱۲ درصد نسبت به فن‌آوری‌های رایج پخت نان برسد (Li *et al.*, 2013). در مطالعه دیگری توسط بعنونی و همکاران (۲۰۰۹) این روش برای پخت نان مورد استفاده واقع شد. نتایج نشان داد که علاوه بر صرفه‌جویی انرژی، مدت زمان پخت نان کاهش پیدا کرد (Banooni *et al.*, 2009). از آن جایی که کاهش کیفیت محصولات خشک شده (شامل رنگ و مواد مغذی) مربوط به زمان طولانی و دمای بالای خشک کردن می‌باشد، استفاده از جت خشک‌کن برخوردی می‌تواند منجر به تولید محصولات با کیفیت بالاتر و دارای رنگ و مواد مغذی بیشتر گردد و هم‌چنین باعث منسجم‌تر شدن بافت محصول نهایی می‌شود (Wang *et al.*, 2015).

با توجه به عدم وجود نوع خشک شده این میوه در بازار ایران و همچنین نوین بودن روش خشک کردن با جت برخوردی، در این پژوهش به بررسی متغیرهای موثر بر کیفیت و زمان خشک شدن توت‌فرنگی از جمله دما، سرعت هوا و نسبت فاصله نازل تا سطح محصول به قطر نازل (H/D) پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها

توت‌فرنگی از یک گلخانه در شهر سنندج به‌صورت روزانه تهیه و به‌صورت بسته‌بندی شده در شرایط ۲ تا ۴ درجه سلسیوس تا زمان انجام آزمایش‌ها نگهداری شد. قبل از خشک کردن، توت‌فرنگی‌ها در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند تا به دمای محیط (۲۵ درجه) برسند. توت‌فرنگی توسط یک برش‌زن (مدل MS42006N ساخت شرکت Siemens آلمان) با ضخامت ۲ میلی‌متر برش داده شد و تعدادی برگه با وزن ۵۸/۱۵±۵/۷۶ گرم بر روی توری به‌صورت لایه نازک در دستگاه خشک‌کن قرار داده شد. توزین نمونه‌های در حال خشک شدن با استفاده از ترازوی ۰/۰۱ گرم (مدل TE15025 ساخت شرکت Sartorius انگلستان) در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه انجام گردید.

خشک کردن

به‌منظور بررسی سینتیک خشک شدن توت‌فرنگی، آزمایش‌ها در سه سطح دما (۴۵، ۵۵ و ۶۵ درجه سلسیوس)، سرعت هوا در سه سطح (۶، ۹ و ۱۲ متر بر ثانیه) بر اساس فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی و H/D[1] در پنج سطح (۴، ۵، ۶، ۷ و ۸) در قالب طرح تک عامله در ضخامت برگه ۲ میلی‌متر انجام و اختلاف بین میانگین‌ها با آزمون دانکن مقایسه گردید. خشک شدن نمونه‌ها تا رسیدن رطوبت به ۰/۱۵ بر مبنای وزن تر (۰/۱۷ بر مبنای خشک) ادامه یافت (Li *et al.*, 2016). آزمایش‌ها در دو تکرار انجام و میانگین داده‌ها برای

1- Relative nozzle-to-product distance

تحلیل نتایج استفاده گردید. در هر آزمایش منحنی نسبت رطوبت در مقابل زمان ترسیم و با استفاده از شیب منحنی‌ها ضریب انتشار موثر و انرژی فعال‌سازی محاسبه گردید. در نهایت به‌منظور به‌دست آوردن مدل مناسب برای پیش‌بینی روند خشک شدن، مدل‌های مختلفی بر داده‌ها برازش شد.

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه خشک‌کن جت برخوردی طراحی شده در گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج استفاده گردید (شکل ۱).



شکل ۱– سامانه خشک‌کن: ۱) دمنده هوا، ۲) سیستم کنترل‌کننده دما و سرعت هوای خشک‌کن، ۳) گرم‌کننده الکتریکی هوا، ۴) پلنوم و نازل‌ها

Fig.1. Drying system: 1) Air blower, 2) Air temperature and velocity control unit, 3) Electric heater, 4) Plenum and nozzles

برای گرم کردن دمای هوای خروجی از نازل‌ها، از گرم‌کن الکتریکی ۱۲ کیلووات استفاده شده است. دمای هوای گرم توسط کنترل‌کننده PID[1] (مدل TC4W ساخت شرکت Autonics) انجام شد. هوا پس از گرم شدن در گرم‌کن وارد محفظه متصل به نازل‌ها شده و سپس از طریق نازل‌ها به‌طور مستقیم به سطح محصول برخورد می‌کند. سرعت هوای خارج شده از نازل‌ها توسط اینورتر کنترل و تنظیم گردید. همچنین در این خشک‌کن از مکانیزم پیچ و مهره برای تغییر نسبت H/D بهره گرفته شد.

اندازه‌گیری رطوبت اولیه

برای اندازه‌گیری رطوبت اولیه مطابق استاندارد ASAE S358.2 مقدار ۲۵ گرم از نمونه مرطوب را توزین کرده و به مدت ۲۴ ساعت درون آون تحت دمای ۷۵ درجه سلسیوس قرار داده تا خشک شود، پس از سپری شدن این مدت نمونه خشک شده توزین و با توجه به رابطه (۱) مقدار رطوبت اولیه محاسبه گردید. این عمل در سه تکرار به‌منظور افزایش دقت آزمایش انجام گرفت.

$$M_0=\frac{W_w-W_d}{W_w}\times 100 \qquad (۱)$$

که M_0 رطوبت اولیه بر مبنای تر و W_w وزن نمونه مرطوب و W_d وزن نمونه خشک شده می‌باشد.

محاسبه ضریب نفوذ موثر رطوبت

برای به‌دست آوردن ضریب نفوذ موثر از قانون دوم فیک $\frac{\partial M}{\partial t}=\nabla\left[D_{eff}\times(\nabla M)\right]$ استفاده می‌گردد. صورت ساده این قانون برای لایه‌های نازک و برای مدت زمان طولانی خشک کردن عبارت است از (Wang *et al.*, 2015):

$$MR=\frac{M-M_e}{M_0-M_e}=\frac{8}{\pi^2}\exp(-\pi^2\frac{D_{eff}t}{L^2}) \qquad (۲)$$

در این رابطه MR عبارت است از نسبت رطوبت، M مقدار رطوبت، M_0 مقدار رطوبت اولیه، M_e مقدار رطوبت تعادلی (در این آزمایش‌ها به‌منظور ساده‌سازی و به دلیل کوچک بودن مقدار M_e در برابر M یا M_0، نسبت رطوبت را برابر مقدار رطوبت بر مقدار رطوبت اولیه یعنی $MR=\frac{M}{M_0}$ در نظر می‌گیرند)، D_{eff} ضریب موثر نفوذ (متر

1- Proportional Integral Derivative

مربع بر ثانیه) و L نصف ضخامت برگه توت‌فرنگی می‌باشد (Sadin *et al.*, 2014).

ضریب نفوذ موثر از طریق رسم نمودار Ln (MR) در مقابل زمان خشک شدن برای هر آزمایش ترسیم و با جای‌گذاری شیب نمودار در رابطه (۳) ضریب انتشار موثر محاسبه گردید.

$$K_0 = \frac{\pi^2 \times D_{eff}}{4 \times L^2} \quad (۳)$$

در این رابطه K_0 شیب نمودار می‌باشد (Mohammadi *et al.*, 2019).

محاسبه انرژی فعال‌سازی

انرژی فعال‌سازی مقدار کار مورد نیاز برای جدا کردن یک مول رطوبت از مقدار معینی ماده می‌باشد. این پارامتر از طریق معادله آرنیوس (۴) به‌دست می‌آید (Khodabakhsh *et al.*, 2015).

$$D_{eff} = D_0 \exp\left[-\frac{E_a}{R(T+273.15)}\right] \quad (۴)$$

در این رابطه E_a انرژی فعال‌سازی بر حسب $kJ\ mol^{-1}$، R ثابت عمومی گازها ($kJ\ mol^{-1}\ K^{-1}$)، T دما و D_0 ضریب انتشار مرجع بر حسب $m^2\ s^{-1}$ می‌باشد. برای محاسبه انرژی فعال‌سازی نمودار Ln (D_{eff}) در مقابل $^1/_{(T+273.15)}$ رسم و با قرار دادن شیب نمودار به‌دست آمده در رابطه (۵) انرژی فعال‌سازی محاسبه گردید.

$$K_1 = -\frac{E_a}{R} \quad (۵)$$

در رابطه (۵) K_1 شیب نمودار می‌باشد (Mirzaee *et al.*, 2009).

مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک شدن

برای مدل‌سازی ریاضی سینتیک خشک شدن لایه‌های نازک توت‌فرنگی از نسبت رطوبت در طی خشک شدن نمونه‌ها استفاده خواهد شد. براساس تحقیقات انجام شده برای محصولاتی مانند توت‌فرنگی که دارای رطوبت بالایی بوده و زمان خشک شدن طولانی است، از رابطه (۶) استفاده گردید (Radhika *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2010a).

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (۶)$$

با برازش دادن مدل‌های ریاضی پرکاربرد توسط محققین مختلف در خشک کردن برگه میوه‌ها (جدول ۱) بر داده‌های حاصل از آزمایش‌ها و به‌کارگیری دو معیار ضریب تبیین[۱] (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا[۲] (RMSE) بهترین مدل انتخاب شد.

اندازه‌گیری آبگیری مجدد

آبگیری مجدد نمونه‌های خشک شده در بشر ۲۰۰ میلی‌لیتری حاوی ۱۵۰ میلی لیتر آب مقطر انجام شد. آزمایش‌ها در دمای ۳۰ درجه سلسیوس صورت گرفت. ۳ گرم از برگه‌های توت‌فرنگی خشک شده درون بشر آب مقطر ریخته شده و پس از ۲۰ دقیقه از آب خارج و پس از خشک کردن سطح آنها با استفاده از یک ترازوی ۰/۰۰۱ گرم توزین گردید. آبگیری نمونه‌های هر تیمار در سه تکرار انجام و نسبت آبگیری مجدد طبق رابطه زیر استفاده شد (Cunningham *et al.*, 2008).

$$\text{نسبت آبگیری مجدد} = \frac{\text{وزن برگه‌ها بعد از آبگیری مجدد (گرم)}}{\text{وزن برگه‌های خشک (گرم)}} \quad (۷)$$

اندازه‌گیری تغییرات رنگ

برای بررسی تغییرات رنگ ظاهری برگه‌های توت‌فرنگی در طی فرآیند خشک شدن قبل و بعد از عمل خشک شدن، تصویربرداری از نمونه‌ها انجام و به کمک نرم‌افزار ImageJ پارامترهای L^*، a^* و b^* استخراج گردید. L^* معرف روشنایی (۰ تا ۱۰۰)، a^* (سبز تا قرمز) و b^* (آبی تا زرد) دو مولفه رنگی هستند که محدوده آن‌ها ۶۰- تا ۶۰ می‌باشد. آزمایش‌های اندازه‌گیری پارامترهای رنگ در پنج تکرار انجام و تغییرات رنگ با استفاده از رابطه (۸) به‌دست آمد.

$$\Delta E = ((L^* _ L_0^*)^2 + (a^* _ a_0^*)^2 + (b^* _ b_0^*)^2)^{0.5} \quad (۸)$$

جدول ۱- مدل‌های ریاضی مورد استفاده در خشک کردن لایه نازک میوه‌ها

Table 1- Mathematical models used for drying thin films of fruits

مدل **Model**	رابطه ریاضی **Mathematical equation**
وانگ و سینگ[۳] (Lopez-Quiroga *et al.*, 2019)	$MR=1 + a*t + b*t^2$
هندرسون و پابیس[۴] (Zhang and Litchfield, 1991)	$MR=a*\exp(b*t)$
دو جمله‌ای[۵] (Yaldiz *et al.*, 2001)	$MR=a*\exp(b*t) + c*\exp(d*t)$
میدیلی (Midilli *et al.*, 2002)	$MR = a*\exp(-k*t) + c*t$
پیج[۶] (Hassan-Beygi *et al.*, 2009)	$MR= \exp(-k*t^n)$

1- Coefficient of determination
2- Root mean square error

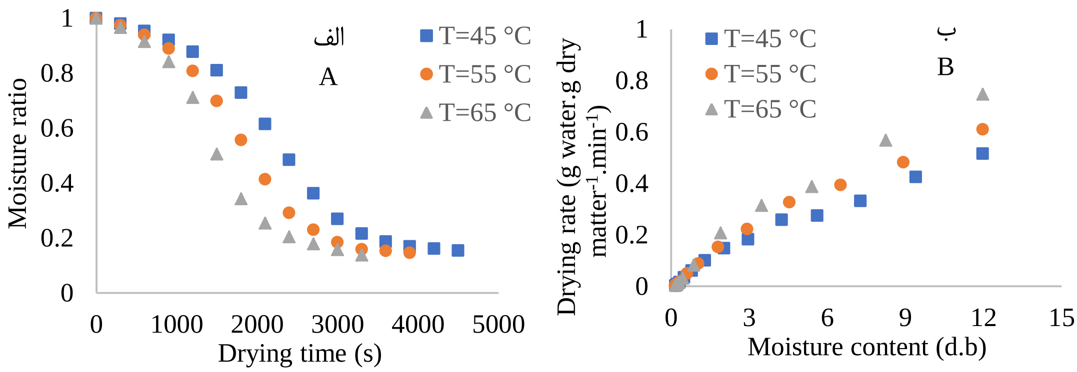
3- Wang and Singh
4- Henderson and Pabis
5- Two Term
6- Page

نتایج و بحث

رطوبت اولیه توت‌فرنگی برابر با ۹۲ درصد بر مبنای وزن تر به‌دست آمد.

تاثیر دما بر نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن

همان‌طور که در نمودار شکل (۲- الف) مشهود است افزایش دمای هوا زمان خشک شدن را کاهش داده است. علت این امر افزایش گرادیان درجه حرارت بین هوای داغ و سطح نمونه و در نتیجه افزایش انتقال حرارت و سرعت خشک شدن به دنبال افزایش دمای هوا می‌باشد. این نتیجه با نتایج مطالعات ژایو و همکاران (۲۰۱۰) مشابهت دارد (Xiao *et al.*, 2010a). با افزایش دما به دلیل بالا رفتن ظرفیت هوا برای جذب رطوبت و نیز افزایش انرژی برای دفع رطوبت از ماده تبادل سریع رطوبت و کاهش قابل توجه مدت زمان خشک شدن بین تیمارهای آزمایش را به دنبال خواهد داشت (Dikbasan, 2007). از آنجا که انرژی مصرفی در فرآیند خشک کردن محصول تحت تاثیر زمان خشک شدن و دمای هوا می‌باشد، می‌توان انتظار داشت بازده انرژی در این خشک‌کن‌ها نسبت به خشک‌کن‌های هوای داغ بالاتر باشد. نرخ خشک شدن برگه‌های توت‌فرنگی تحت تاثیر دماهای مختلف در شکل (۲- ب) نشان داده شده است. با توجه به کاهش سریع نرخ خشک شدن در دوره اول و کاهش کندتر در دوره‌های بعدی می‌توان به این نتیجه رسید که دوره نرخ ثابت خشک شدن در فرآیند خشک شدن برگه توت‌فرنگی وجود نداشته و کل فرآیند در دوره نزولی اتفاق می‌افتد و می‌توان گفت که مکانیزم انتقال رطوبت از داخل به طرف سطح محصول به دلیل پدیده انتشار می‌باشد. نتایج مشابهی با هویج (Singh and Cupta, 2007) و کدو تنبل (Doymaz, 2007) نیز به‌دست آمده است.

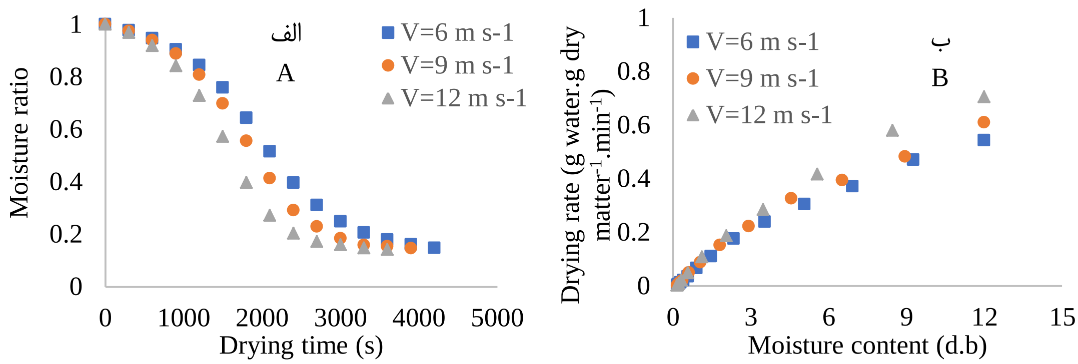


شکل ۲– نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن تحت تاثیر دماهای مختلف (به‌ترتیب الف و ب) در سرعت ۹ متر بر ثانیه (H/D =6)

Fig.2. Influence of different air temperatures on moisture ratio and drying rate at air velocity of 9 m s^{-1} (A and B respectively) (H/D =6)

تاثیر سرعت بر نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن

در نمودار شکل (۳- الف) تاثیر سرعت هوای خروجی نازل بر نسبت رطوبت برگه توت‌فرنگی نشان داده شده است. افزایش سرعت هوای خروجی از نازل منجر به افزایش دبی هوای عبوری از سطح محصول شده و با حذف رطوبت بیشتر کاهش مدت زمان خشک شدن نمونه‌ها را به دنبال خواهد داشت. وانگ و همکاران (۲۰۱۵) و دیکباسان (۲۰۰۷) نیز به این نتیجه رسیده‌اند که افزایش سرعت هوا در خشک‌کن‌های هوای جت سرعت خشک شدن نمونه‌ها را افزایش می‌دهد (Dikbasan, 2007; Wang *et al.*, 2015). سارکار و همکاران (۲۰۰۴) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که در نقطه برخورد هوای جت با سطح محصول ضخامت لایه مرزی نزدیک به صفر بوده و باعث بیشترین میزان انتقال حرارت می‌شود. بعد از این مرحله جریان هوای گرم با حرکت بر روی محصول و بر اثر سرعت، دچار تلاطم و آشفتگی شده و باعث افزایش انتقال حرارت و جرم در برگه‌های توت‌فرنگی شده و در نهایت کاهش مدت زمان خشک شدن محصول را در پی خواهد داشت (Sarkar *et al.*, 2004).

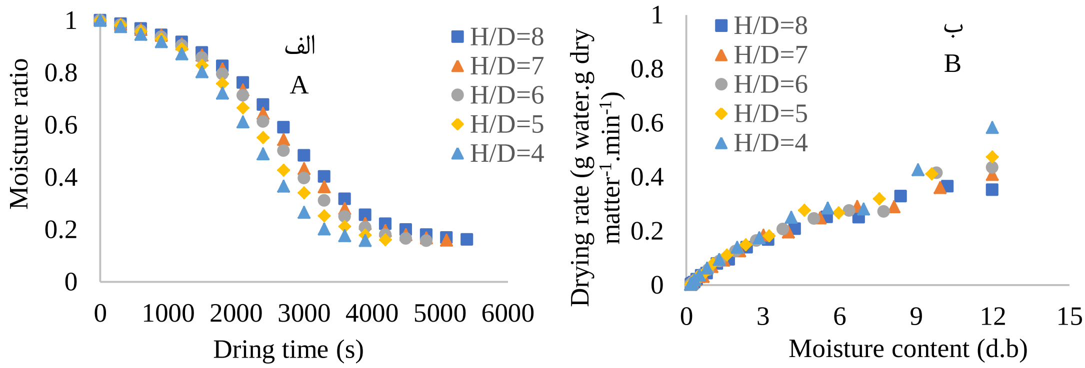


شکل ۳– تاثیر سرعت‌های مختلف هوای خروجی از نازل بر نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن (به‌ترتیب الف و ب) در دمای ۵۵ درجه سلسیوس (H/D =6)

Fig.3. Influence of different air velocity on moisture ratio and drying rate at 55°C (A and B respectively) (H/D =6)

اثر H/D بر نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن

تاثیر H/D از ۴ الی ۸ بر روی نسبت رطوبت در دمای هوای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت‌های ۶ متر بر ثانیه در نمودارهای شکل ۴ نشان داده شده است. طبق نتایج به‌دست آمده بیشترین تغییرات نسبت رطوبت مربوط به H/D=4 و کمترین تغییرات نسبت رطوبت مربوط به H/D=8 بوده است. هنگامی که نسبت H/D برابر با ۴ باشد با توجه به سطوح لحاظ شده برای سرعت هوا، عدد رینولدز بین ۴۰۰۰ و ۷۵۰۰ تغییر می‌کند، و چون برگه‌ها در زمان کمتری خشک شده‌اند می‌توان نتیجه گرفت که انتقال حرارت و جرم بیشتری انجام شده است. این نتیجه با نتیجه چاکرون و همکاران (۱۹۹۸) مطابقت دارد جایی که ایشان بیشترین انتقال حرارت را در نسبت‌های H/D بین ۴ و ۶ در عدد رینولدز بین ۶۵۰۰ تا ۱۹۰۰۰ به‌دست آوردند (Chakron *et al.*, 1998). بحث بیشتر بر روی تاثیر نسبت H/D توسط لی و همکاران (۲۰۱۴) انجام شده است. این محققین بیشترین انتقال حرارت را به نسبت H/D برابر با ۵ در عدد رینولدز ۸۰۰۰ مرتبط دانستند (Lee *et al.*, 2014). همچنین اوبوت و ترابولد (۱۹۸۷) نشان دادند که نسبت H/D های کمتر عملکرد انتقال حرارت بهتری دارد به‌طوری که نسبت H/D برابر با ۴ بیشترین انتقال حرارت را در آزمایش‌های این محققین داشت (Obot and Trabold, 1987).



شکل ٤– تاثیر H/D های مختلف بر روی نسبت رطوبت و نرخ خشک شدن (به‌ترتیب الف و ب) در دمای ۴۵ درجه سلسیوس و سرعت ۶ متر بر ثانیه

Fig.4. Influence of different H/D on moisture ratio and drying rate (A and B respectively) at temperature of 45 ° C and air velocity of 6 m s^{-1}

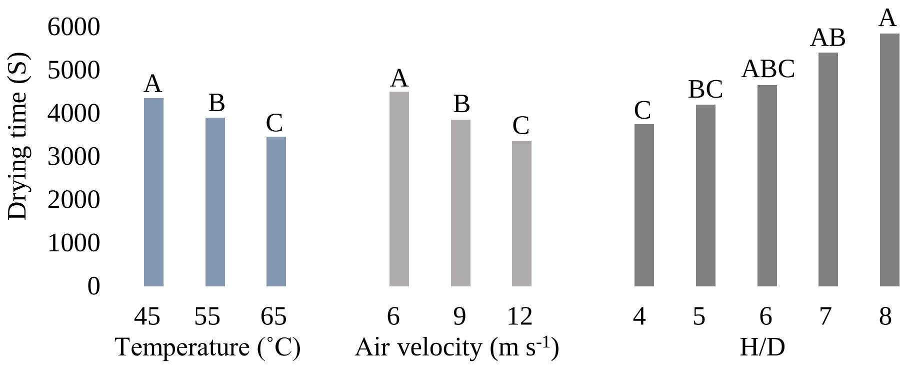
با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۲) مشخص می‌شود که اثر دما و سرعت هوا بر مدت زمان خشک شدن در سطح یک درصد معنی‌دار بوده در حالی‌که اثر متقابل این دو متغیر در سطح پنج درصد هم معنی‌دار نشده است. همچنین از جدول ۲ استنباط می‌شود که نسبت H/D اثر معنی‌دار در سطح ۵ درصد روی مدت زمان خشک شدن دارد. این اثرات به سبب افزایش انتقال حرارت و جرم بین هوای خشک کن و برگه‌های توت‌فرنگی می‌باشد (Li *et al.*, 2016; Sarkar and Singh, 2004; Xiao *et al.*, 2010a).

از روی مقایسه میانگین داده‌های دما و سرعت می‌توان استنباط کرد که تاثیر دما بر مدت زمان خشک شدن برگه‌های توت فرنگی بیشتر از سرعت هوا می‌باشد (شکل ۵). این نتیجه توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Wang *et al*., 2015; Xiao *et al*., 2010a). همچنین مقایسه میانگین داده‌ها در شکل ۵ نشان می‌دهد که کاهش نسبت H/D از ۸ به ۴، باعث افت محسوس مدت زمان خشک شدن خواهد شد.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات دما، سرعت هوا و نسبت H/D بر روی مدت زمان خشک شدن

Table 2- ANOVA results of the effects of temperature, velocity and H/D on the drying time

منبع **Source**	درجه آزادی **DF**	میانگین مربعات **Mean Square**	مقدار **F**	مقدار **P**
دما Temperature	2	1995000	39.90	0.000
سرعت Velocity	2	1215000	24.30	0.000
دما × سرعت Temperature× Velocity	4	37500	0.75	0.582
خطا Error	9	50000		
H/D	4	1471500	10.90	0.011
خطا Error	5	135000		



شکل ۵- مقایسه میانگین دما، سرعت هوا و نسبت H/D بر روی مدت زمان خشک شدن

Fig.5. Means comparison of temperature, air velocity and H/D levels in terms of drying time

ضریب انتشار موثر

همان‌طور که مشخص است با افزایش دما و سرعت هوا، ضریب انتشار موثر افزایش می‌یابد که علت آن وابسته بودن ضریب انتشار موثر به دمای خشک شدن، واریته و ساختار نمونه‌ها می‌باشد این نتیجه با نتایج تحقیق ژایو و همکاران (۲۰۱۲) مطابقت دارد (Xiao *et al*., 2012). وقتی نمونه‌ها در دمای بالاتر خشک می‌شوند انرژی حرارتی باعث افزایش سرعت حرکت مولکول‌های آب و نهایتاً افزایش ضریب انتشار موثر می‌شود (Rao, 1986). در این پژوهش طبق جدول ۳ ضریب انتشار موثر بین $۱/۶۲×۱۰^{-۱۰}$ تا $۳/۲۴×۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانیه متغیر بوده که در محدوده قابل قبول $۱۰^{-۹}$ تا $۱۰^{-۱۱}$ برای مواد غذایی قرار دارد و با یافته‌های مادامبا و همکاران (۱۹۹۶) همخوانی دارد (Madamba *et al*., 1996).

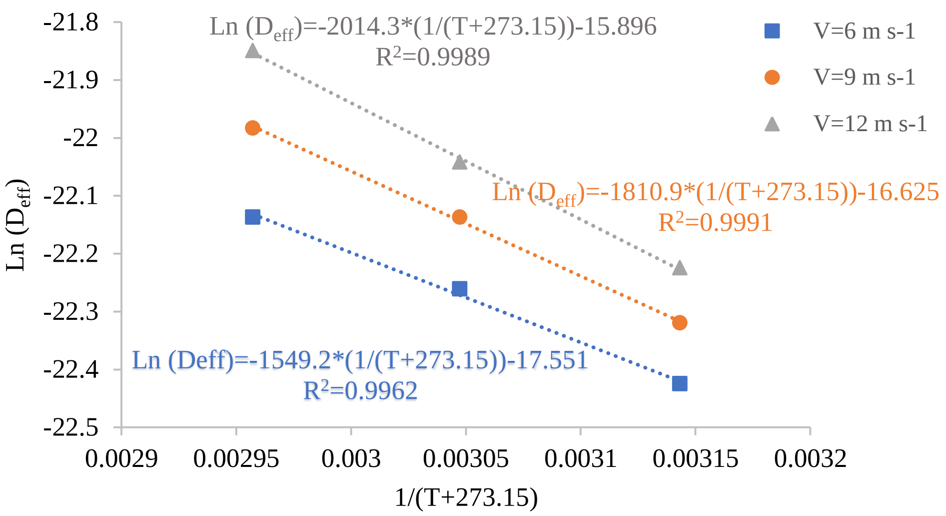
جدول ۳- مقدار ضریب انتشار موثر برگه‌های توت‌فرنگی در ۶= H/D

Table 3- Effective moisture diffusivity value of strawberry slices at H/D=6

سرعت هوا ($m\ s^{-1}$) **Air velocity**	ضریب انتشار موثر ($Deff \times 10^{-10}\ m^2\ s^{-1}$) **Effective moisture diffusivity**		
	45 C˚	55 C˚	65 C˚
6	1.62	2.04	2.49
9	2.02	2.45	2.87
12	2.43	2.83	3.24

انرژی فعال‌سازی

از انرژی فعال‌سازی برای پیش‌بینی و محاسبه انرژی مورد نیاز برای حذف رطوبت و خشک کردن محصولات استفاده می‌شود. رابطه بین ضریب انتشار موثر رطوبت و دما در شکل ۶ در شرایط مختلف خشک شدن برگه‌های توت‌فرنگی نشان داده شده است. مقدار انرژی فعال‌سازی برگه‌های توت‌فرنگی در محدوده ۱۲/۸۸ تا ۱۶/۷۴۶ کیلوژول بر مول قرار دارد که در محدود قابل‌قبول برای اکثر مواد غذایی (۱۲ تا ۱۱۰ کیلوژول بر مول) قرار دارد. به هرحال مقدار انرژی فعال‌سازی خشک شدن برگه توت‌فرنگی کمتر از خشک کردن با روش‌های دیگر است. لی و هسیه (۲۰۰۸) مقدار انرژی فعال‌سازی را ۳۰ الی ۳۶ کیلوژول بر مول و جانسون و الموخینی (۲۰۱۶) آن را در خشک‌کن کابینتی برابر با ۲۵/۹۲ کیلوژول بر مول به‌دست آورده‌اند (Lee and Hsieh, 2008; Johnson and Almukhaini, 2016).



شکل ٦– رابطه آرنیوس بین ضریب نفوذ موثر رطوبت و دما

Fig.6. Arrhenius-type relationship between effective moisture diffusivity (D_{eff}) and drying air temperature

مدل‌سازی ریاضی

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود در دماها و سرعت‌های مختلف و H/D برابر با ۶، مدل وانگ و سینگ دارای بیشترین R^2 و کمترین RMSE بوده و بنابراین به‌عنوان مدلی مناسب برای پیش‌بینی نسبت رطوبت انتخاب گردید.

جدول ٤– نتایج آماری مدل‌های برازش شده

Table 4- Statistical results of fitted models

دما Temperature	سرعت Velocity	مدل پیج Page Model		مدل وانگ و سینگ Wang and Singh Model		مدل هندرسون و پابیس Henderson and Pabis model		مدل دو عبارتی Two Term model		مدل میدیلی و همکاران Midilli *et al.* model	
		R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
	6	0.907	0.6057	0.972	0.0547	0.902	0.1096	0.979	0.0527	0.931	0.5374
45	9	0.886	0.4695	0.991	0.0317	0.931	0.0866	0.975	0.0600	0.940	0.3758
	12	0.779	0.4859	0.988	0.0375	0.848	0.1358	0.972	0.0666	0.927	0.2944
	6	0.795	0.5859	0.993	0.0254	0.893	0.1048	0.991	0.0335	0.959	0.2739
55	9	0.808	0.5343	0.993	0.0276	0.927	0.0952	0.991	0.0360	0.945	0.2553
	12	0.791	0.3890	0.995	0.0253	0.933	0.0908	0.992	0.0400	0.962	0.1781
	6	0.801	0.5388	0.933	0.0259	0.871	0.1218	0.989	0.0383	0.949	0.2688
65	9	0.842	0.4159	0.996	0.0207	0.910	0.1032	0.985	0.0510	0.938	0.2527
	12	0.793	0.3436	0.986	0.0440	0.868	0.1361	0.979	0.0678	0.960	0.1567

بررسی متغیرهای مختلف بر نسبت آبگیری مجدد

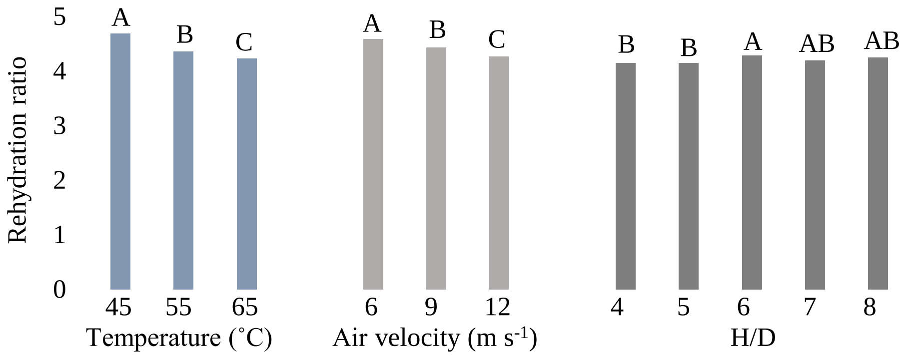
با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۵) مشخص می‌شود که

اثر دما و سرعت هوا بر نسبت آبگیری مجدد در سطح یک درصد معنی‌دار بوده در حالی‌که اثر متقابل این دو متغیر معنی‌دار نشده است. همچنین نتایج تجزیه واریانس تاثیر سطوح مختلف H/D بر نسبت آبگیری مجدد که در جدول ۵ آمده است، حاکی از آن است که اثر H/D بر نسبت آبگیری مجدد در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. از مقایسه میانگین اثرات دما و سرعت هوا (شکل ۷) استنباط می‌شود که با افزایش دما و سرعت هوای خروجی میزان آبگیری مجدد کاهش پیدا کرده است که این امر می‌تواند نشان‌دهنده فرآیند سفت شدن سطحی باشد. به‌طوری‌که با افزایش دما و خروج رطوبت سطحی، مواد محلول به سطح محصول آمده و باعث سفت شدن سطح، کاهش نفوذپذیری و در نتیجه کاهش آبگیری مجدد گشته است. نتایج مشابهی در خشک کردن جنسینگ به روش جت برخوردی گزارش شده است (Xiao *et al.*, 2015). مقایسه میانگین سطوح مختلف H/D نیز نشان می‌دهد که با افزایش نسبت H/D ظرفیت آبگیری افزایش و بالاترین میزان آبگیری در نسبت H/D برابر با ۶ به‌دست آمده است (شکل ۷).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثرات دما، سرعت هوا و نسبت H/D بر نسبت آبگیری مجدد

Table 5- ANOVA results of the effects of the temperature, air velocity and H/D on rehydration ratio

منبع **Source**	درجه آزادی **DF**	میانگین مربعات **Mean Square**	مقدار **F**	مقدار **P**
دما Temperature	2	3368.1	59.20	0.000
سرعت Velocity	2	1474.1	25.91	0.000
دما × سرعت Temperature× Velocity	4	118.7	2.09	0.165
خطا Error	9	56.9		
H/D	4	0.007325	11.63	0.010
خطا Error	5	0.000630		



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر دما، سرعت هوا و نسبت H/D بر نسبت آبگیری مجدد

Fig.8. Means comparison of drying temperature, air velocity and H/D levels in terms of rehydration ratio

تاثیر متغیرهای مختلف بر تغییرات رنگ

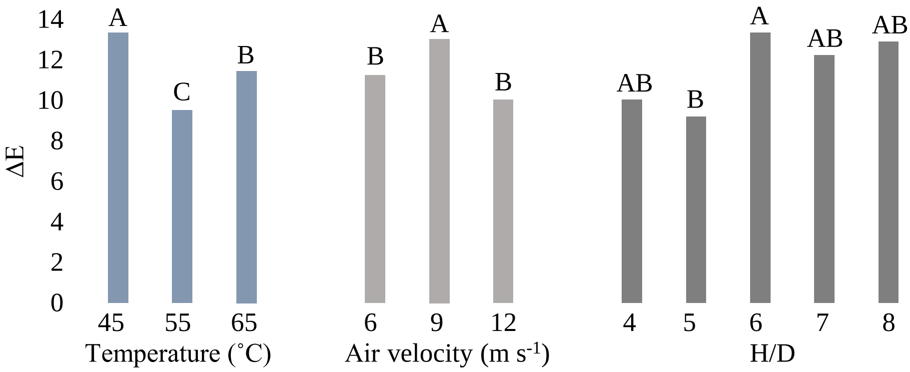
میزان تغییر رنگ برگه میوه خشک شده یکی از ویژگی‌های مهم ارزیابی کیفیت آن می‌باشد که تاثیر زیادی در بازارپسندی آن دارد. از عوامل موثر بر تغییر رنگ می‌توان به شرایط خشک شدن، ضخامت برگه‌ها و مدت زمان خشک شدن اشاره کرد (Caixeta *et al.*, 2002). با توجه به جدول ۶ مشخص می‌شود که اثر دما، سرعت هوا و اثر متقابل آن‌ها بر تغییرات رنگ برگه‌های توت‌فرنگی در سطح یک درصد معنی‌دار بوده و اثر H/D در سطح پنج درصد معنی‌دار می‌باشد.

از مقایسه میانگین اثرات دما و سرعت هوا (شکل ۸) استنباط می‌شود که با افزایش دما و سرعت هوا، میزان تغییرات رنگ (ΔE) کاهش و با افزایش نسبت H/D افزایش دارد. این نتیجه به این دلیل است که کاهش زمان خشک شدن باعث تغییر رنگ کمتر و حفظ بیشتر مواد مغذی می‌گردد. ژایو و همکاران (۲۰۱۰) نیز نتیجه گرفتند که تغییر رنگ زردآلو متاثر از دما و سرعت هوای خشک‌کن می باشد (Xiao *et al.*, 2010c).

جدول ٦- نتایج تجزیه واریانس اثرات دما، سرعت هوا و نسبت H/D بر تغییرات رنگ (ΔE)

Table 6- ANOVA results of the effects of the temperature, air velocity and H/D on color change (ΔE)

منبع Source	درجه آزادی DF	میانگین مربعات Mean Square	مقدار F	مقدار P
دما Temperature	2	3368.1	13.72	0.000
سرعت Velocity	2	1474.1	8.63	0.001
دما × سرعت Temperature× Velocity	4	118.7	8.77	0.000
خطا Error	36	3.975		
H/D	4	16.72	3.93	0.016
خطا Error	20	4.25		



شکل ۸- مقایسه میانگین اثر دما، سرعت هوا و نسبت H/D بر تغییرات رنگ (ΔE)

Fig.8. Means comparison of drying temperature, air velocity and H/D levels in terms of color change (ΔE)

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که متغیرهای دمای هوا و سرعت هوا بیشترین تاثیر و H/D کمترین تاثیر را بر مدت زمان خشک شدن در محدوده مطالعه داشتند. اثر دما و سرعت هوا بر مدت زمان خشک شدن در سطح یک درصد معنی‌دار بوده در حالی‌که اثر متقابل این دو متغیر در سطح پنج درصد هم معنی‌دار نشده است. همچنین نتایج نرخ خشک شدن بیانگر این بود که تاثیر دمای هوا بر این پارامتر بیشتر از سرعت هوا بوده و افزایش H/D سرعت خشک شدن برگه‌های توت‌فرنگی را کاهش می‌دهد. از دیگر نتایج تحقیق افزایش ضریب انتشار موثر همراه با افزایش دما و سرعت هوا است. این پارامتر از طریق ترسیم شیب خط برازش بر منحنی Ln (MR) در مقابل زمان به‌دست آمده و مقدار آن از $۱/۶۲\times۱۰^{-۱۰}$ تا $۳/۲۴\times۱۰^{-۱۰}$ متر مربع بر ثانیه تغییر کرد. مقدار انرژی فعال‌سازی برگه‌های توت‌فرنگی ۱۲/۸۸ تا ۱۶/۷۴ کیلوژول بر مول تعیین شد. نتایج مدل‌سازی ریاضی نشان داد که مدل وانگ و سینگ دارای بیشترین R^2 و کمترین RMSE بوده و بنابراین به‌عنوان مدلی مناسب برای پیش‌بینی نسبت رطوبت انتخاب گردید. ارزیابی نسبت آبگیری مجدد نمونه‌ها مشخص کرد که نسبت آبگیری مجدد با افزایش دما و سرعت هوای خروجی کاهش و با بالا رفتن H/D افزایش خواهد یافت. همچنین تغییر رنگ نمونه‌های خشک شده نشان داد که افزایش دما و سرعت هوا به دلیل کاهش زمان خشک شدن میزان تغییر رنگ را کاهش و افزایش نسبت H/D مقدار آن را به دلیل این‌که باعث افزایش زمان خشک شدن می‌شود، افزایش داده است.

References

1. Alnak, D. E., and K. Karabulut. 2018. Analysis of heat and mass transfer of the different moist object geometries with air slot jet impinging for forced convection drying. Thermal Science 22: 2943-2953.
2. Alonzo-Macías, M., A. Cardador-Martínez, S. Mounir, G. Montejano-Gaitán, and K. Allaf. 2013. Comparative study of the effects of drying methods on antioxidant activity of dried strawberry (*Fragaria* Var. *Camarosa*). Journal of Food Research 2: 92.

3. Banooni, S., S. M. Hosseinalipour, A. S. Mujumdar, P. Taherkhani, and M. Bahiraei. 2009. Baking of flat bread in an impingement oven: modeling and optimization. Drying Technology 27: 103-112.
4. Caixeta, A. T., R. G. Moreira, and M. E. Castell-Perez. 2002. Impingement drying of potato chips. Journal of Food Process Engineering 25: 63-90
5. Chakroun, W. M., A. A. Abdel-Rahman, and S. F. Al-Fahed, 1998. Heat transfer augmentation for air jet impinged on a rough surface. Applied Thermal Engineering 18 (12): 1225-1241.
6. Cunningham, S., W. Mcminn, T. Magee, and P. Richardson. 2008. Experimental study of rehydration kinetics of potato cylinders. Food and Bioproducts Processing 86: 15-24.
7. Dikbasan, T. 2007. Determination of effective parameters for drying of apples. Izmir Institute of Technology.
8. Doymaz, I. 2004. Effect of pre-treatments using potassium metabisulphide and alkaline ethyl oleate on the drying kinetics of apricots. Biosystems Engineering 89: 281-287.
9. Doymaz, I. 2008. Convective drying kinetics of strawberry. Chemiacal. Engineering and Processing 47: 914-919.
10. Giampieri, F., T. Y. Forbes-Hernandez, M. Gasparrini, J. M. Alvarez-Suarez, S. Afrin, S. Bompadre, J. L. Quiles, B. Mezzetti, and M. Battino. 2015. Strawberry as a health promoter: an evidence based review. Food & Function 6: 1386-1398.
11. Hafezi, N., M. J. Sheikhdavoodi, S. M. Sajadiye, and M. E. Khorasani Ferdavani. 2016. The study of some physical properties and energy aspects of potatoes drying process by the infrared-vacuum method. Journal of Agricultural Machinery 6 (2): 463-475. (In Farsi).
12. Hassan-Beygi, S., M. Aghbashlo, M. Kianmehr, and J. Massah. 2009. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying. International Agrophysics 23: 129-135.
13. Huang, D., W. Li, H. Shao, A. Gao, and X. H. Yang. 2017. Colour, texture, microstructure and nutrient retention of Kiwifruit slices subjected to combined air-impingement jet drying and freeze drying. International Journal of Food Engineering 13 (7). https://doi.org/10.1515/ijfe-2016-0344.
14. Khodabakhsh, S., A. R. Yousefi, M. Mohebbi, S. M. A. Razavi, A. Orooji, and M. R. Akbarzadeh-Totonchi. 2015. Modeling for drying kinetics of papaya fruit using fuzzy logic table look-up scheme. International Food Research Journal 22: 1234-1239.
15. Johnson, A. C., and E. M. A. Almukhaini. 2016. Drying studies on peach and strawberry slices. Cogent Food & Agriculture 2: 1-9
16. Lee, G. H., and F. H. Hsieh. 2008. Thin layer drying kinetics of strawberry fruit leather. Transactions of the ASABE 51:1699-1705.
17. Lee, J., Z. Ren, P. Ligrani, D. H. Lee, M. D. Fox, and H. K. Moon. 2014. Cross-flow effects on impingement array heat transfer with varying jet-to-target plate distance and hole spacing. International Journal of Heat and Mass Transfer 75: 534-544.
18. Li, W., L. Yuan, X. Xiao, and X. Yang .2016. Dehydration of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices using heat pipe combined with impingement technology. International Journal of Food Engineering 12: 265-276.
19. Li, W., M. Wang, X. Xiao, B. Zhang, and X. Yang. 2015. Effects of air-impingement jet drying on drying kinetics, nutrient retention and rehydration characteristics of Onion (*Allium cepa*) slices. International Journal of Food Engineering 11: 435-446.
20. Li, X. D., M. Alamir, E. Witrant, G. Della-Valle, O. Rouaud, L. Boillereaux, and, C. Josset. 2013. Further investigations on energy saving by jet impingement in bread baking process. 5th Symposium on System Structure and Control, 696-701, Grenoble, France, February 4-6: 2013
21. Lopez-Quiroga, E., V. Prosapio, P. J. Fryer, I. T. Norton, and S. Bakalis. 2019. Model discrimination for drying and rehydration kinetics of freeze-dried tomatoes. Food Process Engineering: e13192.
22. Madamba, P. S., R. H. Driscoll, and K. A. Buckle. 1996. The thin-layer drying characteristics of garlic slices. Journal of Food Engineering 29: 75-97.
23. Midilli, A., H. Kucuk, and Z. Yapar. 2002. A new model for single-layer drying. Drying technology 20: 1503-1513.
24. Mirzaee, E., S. Rafiee, A. Keyhani, and Z. Emam-Djomeh. 2009. Determining of moisture diffusivity and activation energy in drying of apricots. Research in Agricultural Engineering 55: 114-120.
25. Mohammadi, I., R. Tabatabaekoloor, and A. Motevali. 2019. Effect of air recirculation and heat pump on mass transfer and energy parameters in drying of kiwifruit slices. Energy 170: 149-158.
26. Morris, C. E. 1994. Efficient cookers, dryers and fryers. Journal of Food Engineering 10: 115-120.
27. Mujumdar, A. S. 2006. Impingement drying. In Mujumdar, A. S. (Ed.) Handbook of Industrial Drying third edn (UK: Taylor and Francis).
28. Mwithiga, G., and J. O. Olwal. 2005. The drying kinetics of kale (*Brassica oleracea*) in a convective hot air dryer. Journal of Food Engineering 71: 373-378.
29. Obot, N. T., and T. A. Trabold. 1987. Impingement heat transfer within arrays of circular jets: part 1-effects of minimum, intermediate, and complete crossflow for small and large spacings. Journal of Heat Transfer 109: 872-879.

30. Orsat, V., V. Changrue, and G. V. Raghavan. 2006. Microwave drying of fruits and vegetables. Stewart Post-Harvest Rev 6: 4-9.
31. Qiu, G., D. Wang, X. Song, Y. Deng, and Y. Zhao. 2018. Degradation kinetics and antioxidant capacity of anthocyanins in air-impingement jet dried purple potato slices. Food Research International 105: 121-128.
32. Radhika, G., S. Satyanarayana, and D. Rao. 2011. Mathematical model on thin layer drying of finger millet (Eluesine coracana). Advance Journal of Food Science and Technology 3: 127-131.
33. Rao, M. 1986. Rheological properties of fluid foods. Engineering Properties of Foods: 1-47.
34. Sadin R., G. R. Chegini, and H. Sadin. 2014. The effect of temperature and slice thickness on drying kinetics tomato in the infrared dryer. Heat and Mass Transfer 50: 501-507.
35. Sagar, V., and P. S. Kumar. 2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. Journal of Food Science and Technology 47: 15-26.
36. Sarkar, A., N. Nitin, M. V. Karwe, and R. P. Singh. 2004. Fluid Flow and Heat Transfer in Air Jet Impingement. Food Processing 69: 113-122.
37. Sarkar, A., and R. P. Singh. 2004. Air impingement technology for food processing: visualization studies. LWT-Food Science and Technology 37: 873-879.
38. Wae-hayee, M., P. Tekasakul, and C. Nuntadusit. 2013. Influence of nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets. Songklanakarin Journal of Science & Technology 35.
39. Wang, D., J. W. Dai, H. Y. Ju, L. Xie, H. W. Xiao, Y. H. Liu, and Z. J. Gao. 2015. Drying kinetics of American ginseng slices in thin-layer air impingement dryer. International Journal of Food Engineering 11: 701-711.
40. Xiao, H. W., J. W. Bai, L. Xie, D. W. Sun, and Z. J. Gao. 2015. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered. Food and Bioproducts Processing 94: 581-591.
41. Xiao, H. W., C. L. Pang, L. H. Wang, J. W. Bai, W. X. Yang, and Z. J. Gao. 2010a. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. Biosystems Engineering 105: 233-240.
42. Xiao, H. W., Z. J. Gao, H. Lin, and W. X. Yang. 2010b. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes. Journal of Food Process Engineering 33: 899-918.
43. Xiao, H. W., S. X. Zhang, J. W. Bai, X. M. Fang, Z. J. Zhang, and Z. J. Gao. 2010c. Air impingement drying characteristics of apricot. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 26: 318-323.
44. Xiao, H. W., X. D. Yao, H. Lin, W. X. Yang, J. S. Meng, and Z. J. Gao. 2012. Effect of SSB (superheated steam blanching) time and drying temperature on hot air impingement drying kinetics and quality attributes of yam slices. Journal of Food Process Engineering 35: 370-390.
45. Yaldiz, O., C. Ertekin, and H. I. Uzun. 2001. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy 26: 457-465.
46. Zhang, Q., and J. B. Litchfield. 1991. An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. Drying Technology 9: 383-395.
47. Zheng, X., H. W. Xiao, L. Wang, Q. Zhang, J. Bai, L. Xie, H. Ju, and Z. J. Gao. 2014. Shorting drying time of Hami-Melon slice using infrared radiation combined with air impingement drying. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 30: 262-269.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 11, No. 2, Fall- Winter 2021, p. 409-422

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۱، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۴۰۰، ص ۴۲۲-۴۰۹

Effects of Air Impingement Jet Drying on Drying Kinetics and Some Quality Attributes of Strawberry Slices

M. Rad[1], H. Goli[2*], F. Mirahmadi[3]

Received: 27-10-2019
Accepted: 19-01-2020

Introduction

Strawberry plays an important role in human health because of its micronutrients and natural antioxidant content. Increasing storage time and decreasing microbial processes, weight and volume, and eventually facilitating export, has bolded the need for drying this product. The most common drying method is sun drying. This technique requires large areas and lengthens the time to complete the process which is undesirable economically. Furthermore, the final product may be contaminated by dust and insects, and the exposure to solar radiation results in color deterioration. In order to improve the quality, traditional sun drying techniques can be replaced by a more rapid and efficient drying method such as hot-air drying. In recent years air impingement technology has got more attention in the field fruit slices drying due to high heat and mass transfer, decreasing drying time and increasing product quality. The objectives of this study were to investigate the effects of drying conditions on the drying kinetics and quality characteristics including the rehydration ratio of the strawberry slices in an air impingement jet dryer.

Materials and Methods

An air jet impingement dryer with controllable temperature, air velocity, and the relative nozzle-to-product distance (H/D) was used in this study. The experiments were conducted under different temperatures (45, 55, and 65°C), air velocities (6, 9, and 12 m s^{-1}) and H/D ratios (4, 5, 6, 7, and 8). The initial moisture content, effective moisture diffusivity, activation energy, and rehydration ratio were evaluated.

Results and Discussion

The effects of drying temperature and air velocity on the moisture ratio and the drying rate are shown in Figs 2 and 3. As it can be seen, the moisture ratio of strawberry slices decreased with the increase of drying time. The analysis of variance for drying time indicated that increasing drying temperature and air velocity could reduce the drying time. In addition, the effect of drying temperature on drying time was more significant than that of the air velocity. It is clear that the drying rate decreased with moisture content. There was a rapid decrease in drying rate during the initial period and slow decrease at the later stages of the drying process. It is also found that the drying process generally took place in the falling rate period. It is observed that the moisture ratio decreased as H/D ratio fall. The response of drying time was affected significantly ($p< 0.05$) by H/D ratio. The effective moisture diffusivity increased with increasing drying temperature and air velocity. Based on the results reported in this study, the Wang and Singh model with the lowest Root Mean Square Error (RMSE=0.02) and the highest Coefficient of determination (R^2=0.996) provided the best fit to describe the experimental drying data of strawberry slices. The statistical analysis shows that drying temperature and air velocity have significant ($P<0.01$) effect on the rehydration ratio (*RR*) of slices, while the interaction effect was not significant. The means comparison shows that the *RR* of dried slices decreased as drying temperature and air velocity rose. H/D ratio significantly (1%) affected rehydration ratio. The means comparisons shows that the rehydration ratio increased when H/D value varied from 4 to 8. Also, the results of color change represented that color change of dried samples decreased with increase of temperature and air velocity and increased with increase of the H/D ratio.

Conclusions

a) Increasing drying temperature and air velocity dropped the drying time. In addition, the effect of drying temperature on drying time was more significant than that of the air velocity.

b) A constant rate period was not observed in drying of strawberry slices and the whole process of strawberry slices was carried out in the falling rate period.

c) The moisture ratio decreased as H/D ratio dropped, which in turn resulted in saving drying times.

1- MSc Graduate, Department of Food Science and Technology, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

2- Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

3- Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: hgoli58@gmail.com)

d) The Wang and Singh model was found to be the best model to describe the drying kinetics of strawberry slices.

e) The effective moisture diffusivity of strawberry slices ranged from 1.62×10^{-10} to 3.24×10^{-10} m^2 s^{-1}.

f) The values of activation energy of strawberry slices were found to be 12.88, 15.055 and 16.746 kJ mol^{-1} for air velocities of 6, 9 and 12 m s^{-1}, respectively.

g) The rehydration ratio of dried slices dropped as the drying temperature and air velocity rose and increased with increase of the H/D ratio.

h) The color change of dried samples decreased with the increase of temperature and air velocity and increased with the increase of the H/D ratio.

Keywords: Activation energy, Air jet impingement dryer, Color change, Effective moisture diffusivity, Rehydration ratio, Strawberry slices